

Einfluss von Kranfahrtlasten auf die lebensdauerorientierte Auslegung von Rahmentragwerken

Andrés Wellmann Jelic und Dietrich Hartmann
Lehrstuhl für Ingenieurinformatik, Ruhr-Universität Bochum
andres.wellmann@rub.de, hartus@inf.bi.rub.de

1 Einleitung

Praktisch jedes Tragwerk enthält unsichere Systemgrößen. In modernen Normen werden deren Streuungen mit Hilfe eines semi-probabilistischen Nachweiskonzeptes erfasst. Alternativ dazu besteht die Möglichkeit einer Zuverlässigkeitsanalyse, die anhand der stochastischen Eigenschaften der unsicheren Parameter für einen definierten Versagenszustand die Versagenswahrscheinlichkeit des Systems ermittelt.

Im Rahmen des Teilprojekts C5 [1] des DFG-Sonderforschungsbereichs 398 „Lebensdauerorientierte Entwurfskonzepte unter Schädigungs- und Deteriorationsaspekten“ an der Ruhr-Universität Bochum wird, aufbauend auf einer probabilistischen Strukturanalyse, ein Entwurfsmodell für ermüdungssensitive Tragwerke entwickelt. In diesem Kontext wurde auch eine Lebensdaueruntersuchung von Stahlhallen unter besonderer Berücksichtigung von Lasten aus Kranbahnüberfahrten durchgeführt, deren Ergebnisse hier vorgestellt werden.

2 Berechnungsablauf

Für die Abschätzung der Versagenswahrscheinlichkeit für den Grenzzustand der Ermüdung wurden mehrere Teilberechnungen durchgeführt, deren Ablauf in symbolischer Form in Bild 1 dargestellt ist.

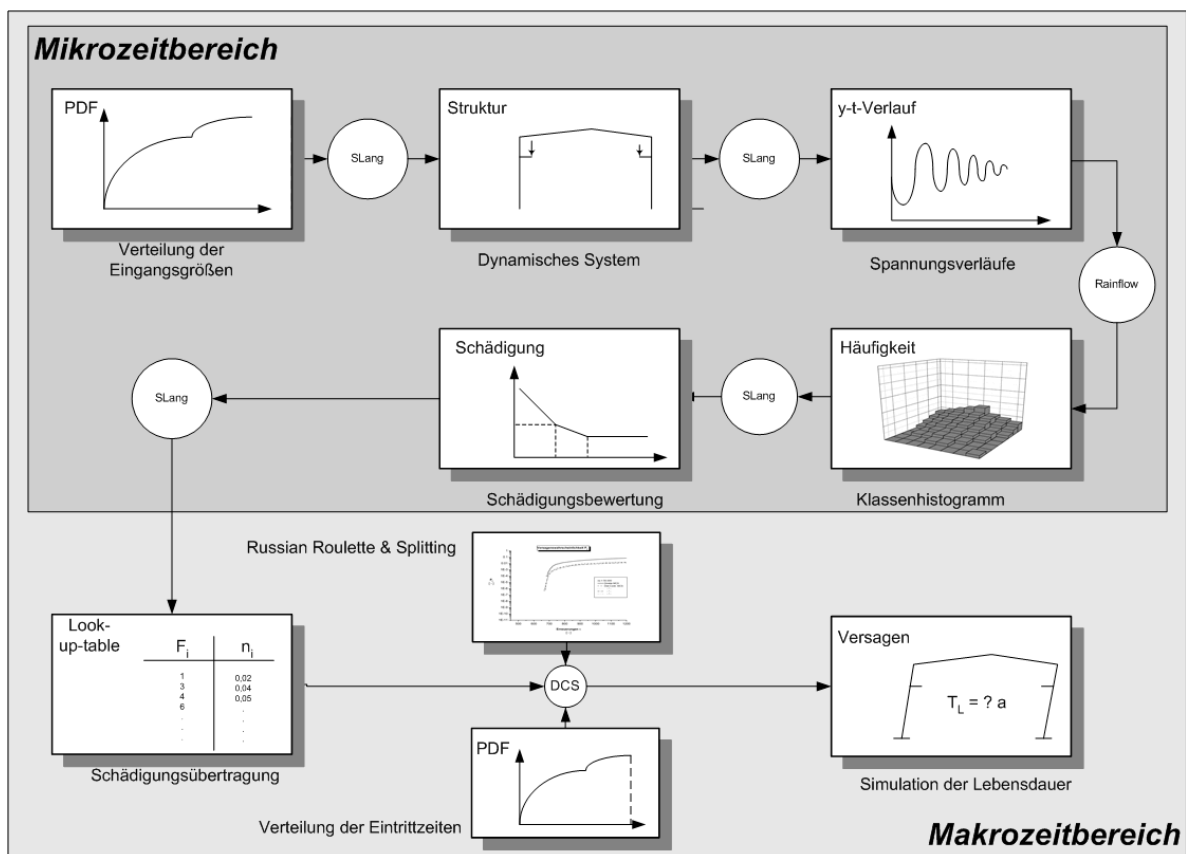


Bild 1: Teilschritte der numerischen Untersuchung

Zunächst wurden die streuenden Parameter im gesamten System als stochastische Größen mit Hilfe geeigneter Verteilungsfunktionen beschrieben. Maßgebende Systemparameter, wie z.B. die Kranabmessungen, wurden im Hinblick auf ihre dynamische Wirkung anhand von Parameterstudien a priori festgelegt, um den Rechenaufwand der Gesamtuntersuchung klein zu halten.

Auf der Grundlage dieser Festlegungen wurde mit Hilfe der FE-Software SLang [2] eine dynamische Strukturanalyse im Mikrozeitbereich, d.h. in einem Zeitbereich von einigen Sekunden bis Minuten, für einen einzelnen Lastimpuls zur Bestimmung des Spannungs-Zeit-Verlaufs durchgeführt. Eine anschließende Rainflow-Zählung lieferte ein Kollektiv der entsprechenden Doppelspannungsamplituden, welche mit Hilfe des Strukturspannungskonzeptes in äquivalente Teilschädigungen überführt wurden. Die Werte dieser Teilschädigungen wurden für jeden Lastimpuls in Abhängigkeit der Parameter *Hublast Q* und *Katzstellung y* in sog. „Look-Up-Tables“ abgelegt.

Im letzten Teilschritt wurde dann in einem Makrozeitbereich von mehreren Stunden eine *Distance-controlled Monte Carlo Simulation* des akkumulierten Schädigungsverlaufs durchgeführt. Die zeitlich aufeinander folgenden Impulslasten aus Kranbahnüberfahrten wurden dabei als poissongesteuerte Pulsprozesse beschrieben.

3 Last- und Systemmodellierung

Bei der Erfassung des Einflusses von Kranlasten auf die Lebensdauer sind mehrere Belastungsarten, wie etwa die Horizontalkräfte auf die Tragkonstruktion infolge Abbremsen und Beschleunigen oder bestimmte Schiefstellungen der Krankonstruktion, zu berücksichtigen. Es wurden jedoch nur Lastsituationen bei Kranbahnüberfahrten untersucht, die sich mit Hilfe des Lastmodells in [3] (s.Bild 3) für die dynamische Strukturanalyse diskretisieren lassen.

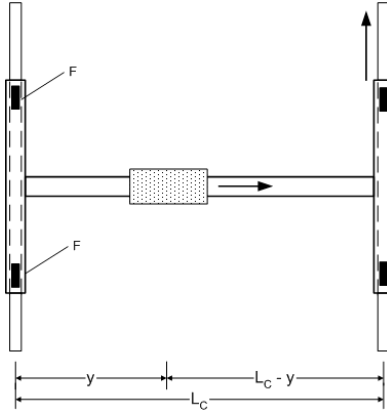


Bild 2: System des Brückenkrans

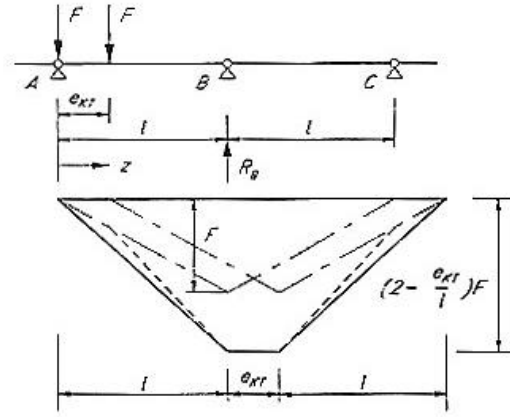


Bild 3: Einflusslinien der Konsolenlast [3]

Dieses Modell definiert eine Übertragungsfunktion zur Bestimmung der Konsolenlast:

$$S_i = \left(2 - \frac{e_{KT}}{l} \right) \cdot F_i \quad (1)$$

aus der Überlagerung der Einflusslinien der Radlasten:

$$F_1 = \frac{Q_{KB}}{4} + \frac{Q + Q_k}{2} \left(\frac{L_C - y}{L_C} \right) \quad F_2 = \frac{Q_{KB}}{4} + \frac{Q + Q_k}{2} \left(\frac{y}{L_C} \right) \quad (2)$$

Eingangsgrößen sind hierbei das Eigengewicht Q_{KB} des Brückenkrans, das Eigengewicht Q_K der Laufkatze und die äußere Kranlast Q . Die jeweilige Pulsdauer ergibt sich zu:

$$T_f = \frac{e_{KT}}{v_K} + 2 \cdot \frac{L_F}{v_K} \quad (3)$$

Das statische System der Rahmenstruktur ist ein gelenkig gelagerter Stahlrahmen aus HEA 550 Profilen (statisch vordimensioniert). Die Diskretisierung des Rahmens erfolgte mit 9-Knoten-Schalenelementen, damit ebene Spannungszustände erfasst werden können. Zusätzlich wurde ein vereinfachtes System aus 3D-Balkenelementen (mit Querschnittswerten für I-Profile) für mehrere Parameterstudien generiert.

4 Parameterstudien des gewählten Systems

Zur Reduzierung des erforderlichen Rechenaufwandes wurde der Einfluss der zwei offensichtlich wichtigsten streuenden Eingangsgrößen (Radstand e_{KT} der Katze, Fahrgeschwindigkeit v_K des Krans) auf die dynamische Berechnung mit Hilfe des oben erwähnten vereinfachten Balkenmodells untersucht. Jede Eingangsgröße wurde dabei getrennt für sich betrachtet.

Zunächst wurde der Wert e_{KT} , der direkt in die Bestimmungsgleichungen des Lastbetrages und der Pulsdauer einfließt, im Bereich von 1,0 – 4,4 m variiert, wobei die maximale Hublast schrittweise zwischen 100 – 500 kN erhöht wurde. Die Ergebnisse dieser Parameterstudie, dargestellt in Bild 4, zeigten, dass der Einfluss des Radstandes e_{KT} auf die Dynamik des Stahlrahmens, unabhängig von der maximalen Hublast Q , vernachlässigbar klein ist.

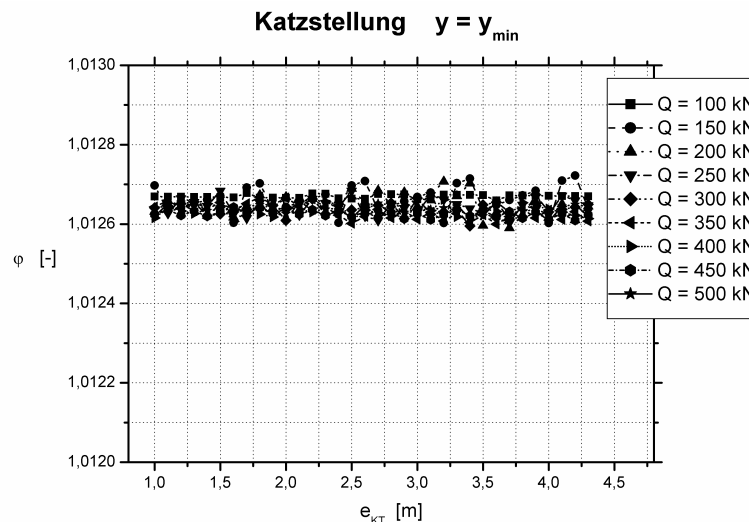


Bild 4: Stoßzahlen in Abhängigkeit der Radstände

In einer zweiten Untersuchung wurde die Fahrgeschwindigkeit v_K in einem Wertebereich von $v_K = 20 - 160$ $\frac{m}{s}$ bei konstanter Hublast $Q = 500$ kN variiert. Dabei waren folgende Effekte zu beobachten (s. Bild 5):

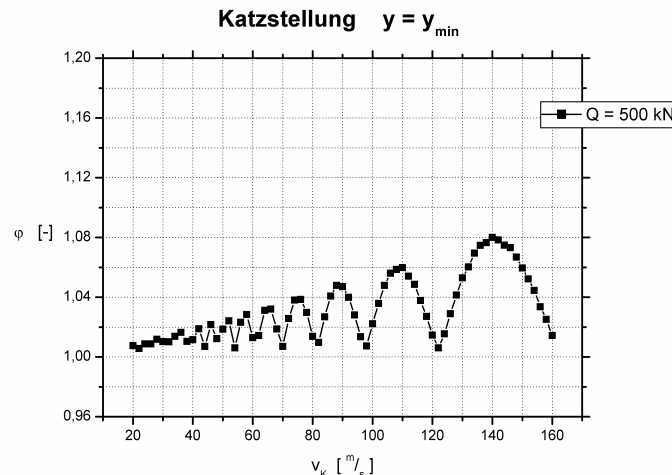


Bild 5: Stoßzahlen in Abhängigkeit der Krangeschwindigkeiten

- Wenn die Geschwindigkeit klein genug ist, reagiert das System quasi-statisch; es treten kaum dynamische Effekte auf.
- Bei höheren Krangeschwindigkeiten treten infolge der Überfahrten dynamische Überhöhungen in den Strukturantworten von maximal 8 % auf.

Abschließend wurde die Übertragbarkeit der Ergebnisse des 3D-Balkenmodells auf das Schalenelementmodell an ausgewählten Varianten über Vergleichsrechnungen verifiziert. Die Ergebnisse sind exemplarisch für variierende Krangeschwindigkeiten v_k und eine Hublast von $Q = 500 \text{ kN}$ in Bild 6 dargestellt.

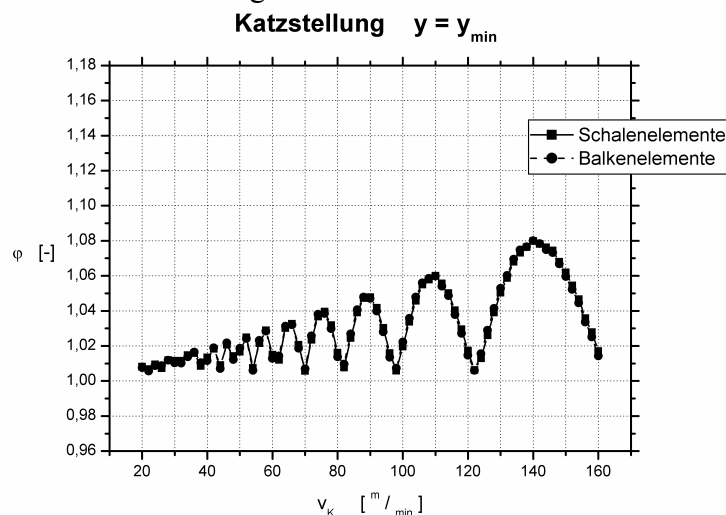


Bild 6: Vergleich der Ergebnisse aus unterschiedlichen Systemmodellen

5 Betriebsfestigkeitsuntersuchung

Die Betriebsfestigkeitsanalyse des Hallenrahmens erfolgte für dasjenige Rahmeneckelement, das in einer statischen Spannungsberechnung die höchsten Spannungsspitzen aufwies. Als maßgebendes Schädigungsereignis wurde hierbei eine einzelne Pulslast aus einer Kranüberfahrt definiert. Die Schädigungsbewertung der dabei entstehenden Spannungskollektive erfolgte mit Hilfe des Wöhlerkonzeptes sowie einer linearen Schadensakkumulation.

Die aus der zugehörigen Strukturanalyse ermittelten Doppelspannungsamplituden lagen jedoch unter dem Dauerfestigkeitsniveau der entsprechenden Kerbgruppe [4]. Bei der hier verwendeten linearen Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren/Miner mussten diese Schwingungsamplituden somit nicht in eine äquivalente Schädigung umgerechnet werden.

Deshalb erfolgte eine neue Berechnung mit modifizierter Schädigungsbewertung. Der große, in Bild 7 dargestellte Spannungsausschlag wurde quasi-statisch bewertet, wobei die offene σ -

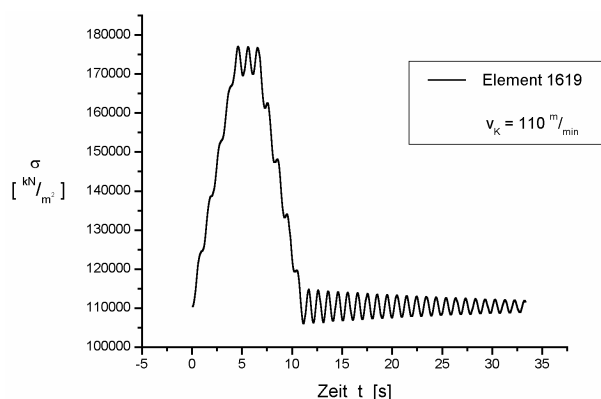


Bild 7: σ -t-Verlauf aufgrund einer Pulslast

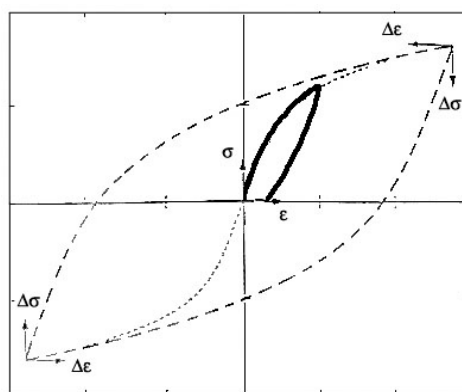


Bild 8: Hysterese des großen Spannungsbogens

ε -Schleife (s. Bild 8) nach [5] künstlich geschlossen wurde. Die daraus berechneten Teilschädigungen d_i wurden in Abhängigkeit der Stellung y der Laufkatze des Krans und der maximalen Hublast Q in einer Übertragungsmatrix für die darauffolgende Makrozeitsimulation abgelegt. Eine grafische Darstellung dieser Matrix findet sich in Bild 9.

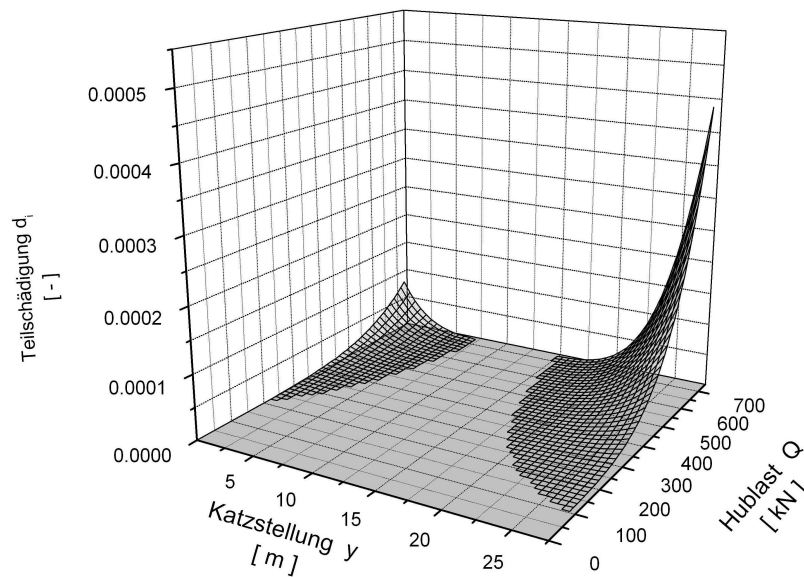


Bild 9: Übertragungsmatrix der Teilschädigungen

6 Simulation der Lebensdauer

Der Verlauf der Lastgeschichte über die Lebensdauer wurde als poissongesteuerter Pulslastprozess realisiert, wobei eine direkte Übertragung der stochastischen Werte Hublast Q und Katzstellung y in eine äquivalente Teilschädigung d_i über die vorher erstellten „Look-Up-Tables“ erfolgte. Diese Simulation wurde als eine *Distance-controlled Monte Carlo Simulation* mit einer Ensemblegröße von $n_{\text{sim}} = 10.000$ durchgeführt. Die dabei erzeugten Samples wurden mit Hilfe der so genannten *Russian Roulette & Splitting* Methode aus [6] fortwährend modifiziert, wobei in Abhängigkeit eines in [6] entwickelten Abstandskriteriums „wichtige“ Realisationen verdoppelt und „weniger wichtige“ nach dem Zufallsprinzip eliminiert werden.

Bei der statistischen Beschreibung der Zufallsvariablen wurden die in Tabelle 1 angegebenen Verteilungstypen eingesetzt:

Parameter	Verteilungstyp
Zwischenzeiten t_w	Exponentialverteilung
Katzstellung y	Gleichverteilung
Hublast Q	Stückweise zusammengesetzte Verteilung

Tabelle 1: Definition der Zufallsgrößen

Die Verteilung der Hublast Q wurde dabei aus den in [7] veröffentlichten Betriebsuntersuchungen von Kranfahrten übernommen. Im Rahmen der bisherigen Untersuchung wurde von einer maximalen Hublast von 16 to bzw. 20 to ausgegangen. In Abhängigkeit der so definierten Parameter treten für eine vorgegebene Lebensdauer von 100 Jahren keine Schadensfälle auf. So ergab sich beispielsweise bei einer Simulation mit einer maximalen Hublast von $Q = 16$ to über einen Zeitraum von 92 Jahren eine Gesamtschädigung von $\Sigma d = 0.31602$. Ein „Schadensfall“ läge aber laut der Palmgren/ Miner-Regel erst bei einer Gesamtschädigung von $\Sigma d = 1,0$ vor. Weitere Ergebnisse solcher Langzeitsimulationen sind in Bild 10 dargestellt.

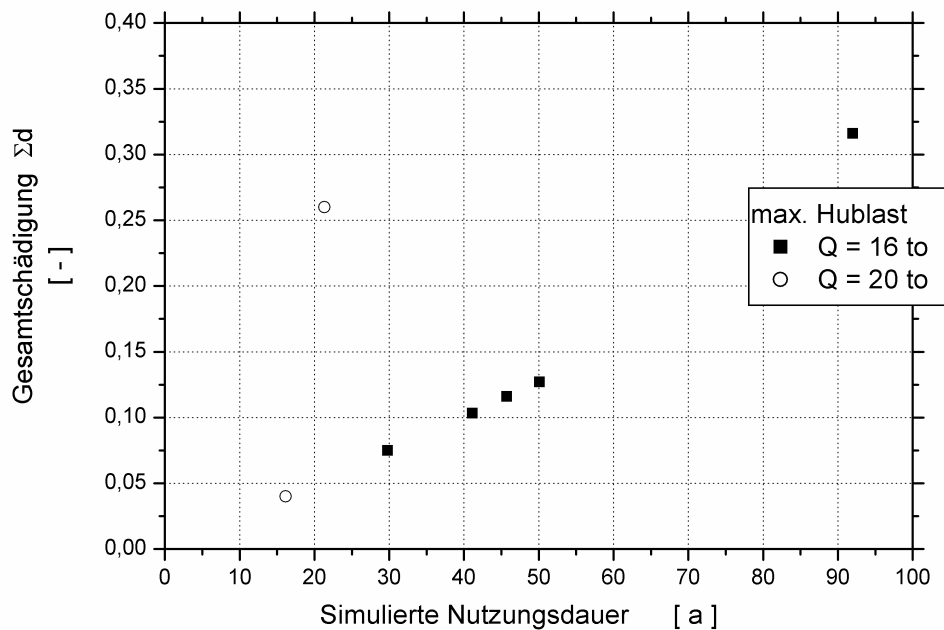


Bild 10: Realisationen der Gesamtschädigung bei unterschiedlicher Hublast

7 Zusammenfassung

Aus der Untersuchung wird ersichtlich, dass der Einfluss von Kranlasten auf den ermüdungs-basierten Entwurf von Industriestahlhallen nach dem hier vorgestellten Berechnungskonzept vernachlässigbar klein ist, da die simulierte Lebensdauer um ein Vielfaches größer ist als die üblicherweise vorgegebene planmäßige Nutzungsdauer von Industriebauten (10 – 40 Jahre). Diese Bewertung gilt jedoch nur für das betrachtete Lastmodell aus Kranbahnüberfahrten, weitere Belastungsarten wie z.B. Querlasten aus Schiefstellungen oder Pulslasten aus Bremsvorgängen sind noch zusätzlich zu untersuchen.

Literatur

- [1] Hartmann, D., Niemann, H.-J. *Teilprojekt C5: Paralleles/verteiltetes Entwurfssystem für die lebensdauerorientierte Auslegung von Tragwerken unter Berücksichtigung von Schädigungen*. Arbeitsbericht 1998-2001, SFB 398. Bochum: Ruhr-Universität Bochum.
- [2] Bucher, C et al. 2000. *SLang – The structural language. Users manual Version 4.0*. Weimar: Bauhaus-Universität Weimar. Institut für Strukturmechanik (unveröffentlicht).
- [3] Pasternak & Rozmarynowski & Wen 1990. *Crane load modeling*, in: Structural Safety (17), pp. 205 – 224.
- [4] DIN V ENV 1993 Teil 1-1. *Eurocode 3. Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten*, Kapitel 9: Ermüdung. Brüssel: CEN.
- [5] Radaj, D. 1995. *Ermüdungsfestigkeit*. Heidelberg: Springer.
- [6] Pradlwatter & Schuëller 1999. *Assessment of low probability events of dynamical systems by controlled Monte Carlo simulation*, in: Probabilistic Engineering Mechanics (14), pp. 213 – 227.
- [7] Köppe, U. 1981. *Nutzlastkollektive von Kranen*, in Hebezeuge und Fördermittel. Berlin.